



Memoria del proyecto para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico

**DESARROLLO PRELIMINAR DE UN MODELO OPERACIONAL
PARA PRONÓSTICOS DE OLEAJE EN EL SENO DE RELONCAVÍ,
REGIÓN DE LOS LAGOS**

Jorge Andrés Pérez Silva

Enero 2023

DESARROLLO PRELIMINAR DE UN MODELO OPERACIONAL PARA PRONÓSTICOS
DE OLEAJE EN EL SENO DE RELONCAVÍ, REGIÓN DE LOS LAGOS

Jorge Andrés Pérez Silva

Comisión Revisora	Nota	Firma
Sergio Bidart Revisor	_____	_____
Mauricio Reyes Revisor	_____	_____
Patricio Winckler Revisor	_____	_____

DECLARACIÓN

Este trabajo, considerado tanto en su totalidad como alguna de sus partes, no ha sido presentado anteriormente en la Universidad de Valparaíso, ni institución universitaria chilena o extranjera u organismo de carácter estatal; ya sea para evaluación, comercialización u otros propósitos. Salvo las referencias citadas en el texto, confirmo que el contenido intelectual de este Proyecto de Título es resultado exclusivamente de mis esfuerzos personales.

La Universidad de Valparaíso reconoce expresamente la propiedad intelectual del autor sobre esta Memoria de Titulación. Sin embargo, en caso de ser sometida a evaluación para los propósitos de obtención del Título Profesional de Ingeniero Civil Oceánico, el autor renuncia a los derechos legales sobre la misma y los cede a la Universidad de Valparaíso, la que estará facultada para utilizarla con fines exclusivamente académicos.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mi madre por su apoyo infinito, sus palabras siempre me dieron el aliento necesario para no flaquear; a mi papá por compartir siempre su sabiduría; y a mis hermanas Brenda, Gloria, Mónica y Ximena, por su amor incondicional.

Agradezco también a la familia Santis Alvear, a Monse y Cami por darme un espacio en sus hogares; a Matías Martínez por compartir desde el primer día una sonrisa; a Alex Lara y Paula Tatán por ser mis compañeros de estudio hasta el final.

Agradezco a todos quienes componen la Escuela de Ingeniería Civil Oceánica; a Matías Quezada y Patricio Winckler, por su labor docente y pasión por enseñar; a la profesora María Elena Valenzuela; a Yasna Vera por su buena voluntad; a Pablo Córdova y Sebastián Correa, por su buena disposición y paciencia cuando llegaba a sus oficinas con dudas.

Finalmente, agradezco a todos los que fueron parte de este largo, pero fugaz recorrido.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
2	ALCANCES Y LIMITACIONES	3
3	OBJETIVOS	4
4	MARCO TEÓRICO	5
4.1	GENERACIÓN DE OLEAJE POR VIENTO.....	5
4.2	MODELO SWAN.....	6
4.2.1	Modelos que promedian la fase.....	6
4.2.2	Ecuación de Balance de Acción Espectral.....	7
4.2.3	Forzante por viento.....	11
4.2.4	Término de interacción no lineal.....	13
4.2.5	Término de disipación.....	14
4.3	MODELOS OPERACIONALES DE OLEAJE.....	15
4.4	VIENTO EN EL SENO RELONCAVÍ.....	17
4.5	DISPOSICIONES DE LA AUTORIDAD MARÍTIMA.....	19
5	METODOLOGÍA	20
5.1	MÓDULO DE OBSERVACIÓN.....	21
5.1.1	Base de datos de viento.....	21
5.1.2	Preparación de los campos de viento.....	21
5.1.3	Modelo Digital de Elevación (MDE).....	22
5.1.4	Parametrización física.....	23
5.2	MÓDULO DE PRONÓSTICO.....	24
5.2.1	Test de convergencia.....	24
5.2.2	Calibración.....	25
5.2.3	Análisis de las formulaciones de SWAN.....	26
5.2.4	Evaluación del desempeño del modelo.....	27

6	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29
6.1	PREPARACIÓN DE LOS CAMPOS DE VIENTO	29
6.2	MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN	33
6.3	TEST DE CONVERGENCIA	35
6.4	CALIBRACIÓN	37
6.4.1	Ejecución Inicial	38
6.4.2	Evaluación de la discretización temporal	39
6.4.3	Evaluación de las formulaciones para el viento	41
6.5	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA CALIBRACIÓN	42
6.6	ANÁLISIS DE LAS FORMULACIONES DE SWAN	45
6.7	MODELO OPERACIONAL	50
7	CONCLUSIONES	52
7.1	INFLUENCIA DE LOS CAMPOS DE VIENTO EN LA CALIBRACIÓN	52
7.2	CONSIDERACIONES AL MODELAR EN SWAN	54
7.3	DESEMPEÑO DEL MODELO	55
7.4	TIEMPOS DE EJECUCIÓN	56
7.5	OPORTUNIDADES Y FUTUROS TRABAJOS	57
8	REFERENCIAS	58
	ANEXO I. CÓDIGOS DE LA CALIBRACIÓN	62
	ANEXO II. CÓDIGOS PARA EL ANÁLISIS DE LAS FORMULACIONES DE SWAN	68
	ANEXO III. CÓDIGO DEL MODELO OPERACIONAL	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Campo de presiones de viento moviéndose sobre la superficie del océano (Holthuijsen, 2007).....	5
Figura 3.2. Variación de la presión de viento inducida por oleaje sobre una onda armónica. (Holthuijsen, 2007)	6
Figura 4.3. Propagación de energía a través de una celda perteneciente a una grilla regular proyectada en la superficie del océano, en el enfoque Euleriano. (Holthuijsen, 2007).....	7
Figura 4.4. Oleaje propagándose en aguas costeras. (Holthuijsen, 2007)	9
Figura 4.5. Distribución de energía direccional para una frecuencia del oleaje en un punto y tiempo determinado. (Holthuijsen, 2007)	9
Figura 4.6. Cambio en la dirección del oleaje debido a la refracción o difracción, representado como la propagación direccional de energía a través de una banda en el espacio direccional. (Holthuijsen, 2007)	10
Figura 4.7. Esquema de los módulos incluidos en el EWS Emilia Romagna. (Ciavola & Coco, 2017)	16
Figura 4.8. Ubicación del punto en donde se obtuvo la información de viento. (Elaboración propia a partir de Google Earth (s.f. a)).	17
Figura 4.9. Gráfica de caja de datos del viento entre los años 1980 y 2013. (Elaboración propia).....	18
Figura 4.10. Rosa de viento año 2010. (Elaboración propia).....	18
Figura 5.1. Mapa conceptual de la metodología a emplear (Elaboración propia).	20
Figura 6.1. Área de estudio. (Elaboración propia a partir de Google Earth (s.f. b))	29
Figura 6.2. Ubicación de los nodos del modelo GFS. (Elaboración propia a partir de Google Earth (s.f. c)).....	30
Figura 6.3. Ejemplo de interpolación temporal. (Elaboración propia)	31
Figura 6.4. Resultado de la interpolación espacial del campo de viento con la componente U del día 08/03/2022 a las 00:00, los puntos en rojo corresponden a las ubicaciones de los nodos del modelo GFS (Elaboración propia)	31
Figura 6.5. Resultado de la interpolación espacial del campo de viento con la componente V del día 08/03/2022 a las 00:00; los puntos en rojo corresponden a las ubicaciones de los nodos del modelo GFS (Elaboración propia)	32

Figura 6.6. Campo de viento resultante; los puntos en rojo corresponden a las ubicaciones de los nodos del modelo GFS. (Elaboración propia).....	32
Figura 6.7. Información batimétrica presente en las cartas náuticas seleccionadas. (Elaboración propia).....	33
Figura 6.8. Modelo de elevación digital del seno de Reloncaví con resolución espacial de 58,275 [m]. (Elaboración propia)	34
Figura 6.9. Ubicación nodos del test de convergencia. (Elaboración propia a partir de Google Earth (s.f. d)).....	36
Figura 6.10. Resultado test de convergencia. (Elaboración propia)	37
Figura 6.11. Ubicación registro de oleaje. (Elaboración propia a partir de Google Earth (s.f. e))	38
Figura 6.12. Series de tiempo de H_{m0} modelado versus registro, caso C01. (Elaboración propia).....	39
Figura 6.13. Series de tiempo de H_{m0} modelado versus registro, caso C02. (Elaboración propia).....	40
Figura 6.14. Series de tiempo de H_{m0} modelado versus registro, caso C03. (Elaboración propia).....	41
Figura 6.15. Series de tiempo de H_{m0} modelado versus registro para el análisis estadístico del caso C03. (Elaboración propia)	42
Figura 6.16. A) Gráfico de dispersión entre modelo G3Bk (H_{m0} mod) y registro (H_{m0} med). B) Gráfico de dispersión entre modelo G3Bk con corrección lineal (H_{m0} mod ^{CL}) y registro (H_{m0} med). (Elaboración propia)	43
Figura 6.17. A) Gráfico de dispersión entre modelo G3ABk (H_{m0} mod) y registro (H_{m0} med). B) Gráfico de dispersión entre modelo G3ABk con corrección lineal (H_{m0} mod ^{CL}) y registro (H_{m0} med). (Elaboración propia).....	43
Figura 6.18. A) Gráfico de dispersión entre modelo G3ABj (H_{m0} mod) y registro (H_{m0} med). B) Gráfico de dispersión entre modelo G3ABj con corrección lineal (H_{m0} mod ^{CL}) y registro (H_{m0} med). (Elaboración propia).....	44
Figura 6.19. MDE simplificado, los puntos rojos son los nodos en donde se obtuvo la altura significativa y las flechas negras la dirección del viento. (Elaboración propia).....	46
Figura 6.20. Gráfico de barras con los resultados de la altura significativa para las formulaciones de Komen (1984) y Janssen (1989, 1991). (Elaboración propia).....	47

Figura 6.21. Gráfico de barras con los resultados de la altura significativa para la formulación de Janssen (1989, 1991) con las parametrizaciones de whitecapping de Komen y Janssen. (Elaboración propia).....	48
Figura 6.22. Gráfico de barras con las diferencias de la activación del mecanismo lineal. (Elaboración propia).....	49
Figura 6.23. Gráfico de barras con las diferencias de la activación del mecanismo lineal en el nodo N2. (Elaboración propia).....	49
Figura 6.24. Diagrama de flujo de modelo operacional. (Elaboración propia)	50
Figura 7.1. Ubicaciones nodos modelo ERA5 (marcadores amarillos). (Elaboración propia a partir de Google Earth (s.f. f))	53

LISTA DE TABLAS

Tabla 5.1. Valores definidos para detener el proceso iterativo del modelo.....	25
Tabla 5.2. Mecanismos de generación activados en los modelos del caso C03.	26
Tabla 5.3. Factores de peso para cada estadígrafo. (elaboración propia).....	28
Tabla 6.1. Coordenadas área del modelo.	29
Tabla 6.2. Coordenadas nodos del modelo GFS.	30
Tabla 6.3. Cartas náuticas utilizadas para elaborar el DEM.	33
Tabla 6.4. Resolución modelos de elevación digital.	34
Tabla 6.5. Resumen test de convergencia.	35
Tabla 6.6. Rendimiento casos test de convergencia.	35
Tabla 6.7. Coordenadas nodos del test de convergencia.....	36
Tabla 6.8. Tiempo de ejecución casos calibración.	37
Tabla 6.9. Resumen parametrización del modelo de la Ejecución Inicial. (Elaboración propia).....	38
Tabla 6.10. Resumen modelos ejecutados en la Evaluación de la Discretización Temporal.....	39
Tabla 6.11. Resumen modelos Caso C03.....	41
Tabla 6.12. Estadígrafos estimados para las simulaciones de la evaluación de las formulaciones para el viento.	44
Tabla 6.13. Puntajes de desempeño para los modelos de la evaluación de las formulaciones para el viento.	45
Tabla 6.14. Parametrizaciones físicas modelos simplificados.	46

LISTA DE SÍMBOLOS

LETRAS LATINAS

- A : Coeficiente asociado al crecimiento lineal del oleaje.
- B : Coeficiente asociado al crecimiento debido al mecanismo exponencial.
- b : Intercepto de la regresión lineal entre los valores observados y los valores modelados de la altura significativa sin corregir.
- c : Celeridad de fase.
- c_g : Celeridad de grupo de la ola.
- C_{ds} : Coeficiente ajustable de la formulación de Hasselmann (1974).
- C_D : Coeficiente de arrastre adimensional.
- $c_{g,x}$: Componente x de la velocidad de grupo de la ola, igual a $c_g \cos \theta$.
- $c_{g,y}$: Componente y de la velocidad de grupo de la ola, igual a $c_g \sin \theta$.
- c_θ : Tasa de giro inducida por refracción o difracción.
- D_p : Dirección peak del oleaje.
- E : Densidad de energía.
- f : Frecuencia de la ola.
- g : Aceleración de gravedad.
- G : Función de corte.
- H_{m0} : Altura significativa espectral.
- k : Número de ola.
- \bar{k} : Número de ola promedio.
- m : Pendiente de la regresión lineal entre los valores observados y los valores modelados de la altura significativa sin corregir.
- n : Cantidad de datos.
- N : Densidad de acción.

- P : Exponente ajustable de la formulación de Hasselmann (1974).
- R^2 : Coeficiente de determinación.
- \bar{S} : Peralte promedio.
- $\overline{S_{PM}}$: Peralte promedio para el espectro de Pierson-Moskowitz.
- S : Término fuente.
- S_{diss} : Término de disipación.
- S_{surf} : Término de disipación por rotura.
- S_{in} : Término de la forzante por viento.
- S_{bfr} : Término de fricción de fondo.
- S_{nl} : Término de interacción no lineal entre olas.
- S_{nl3} : Término de interacción entre triadas.
- S_{nl4} : Término de interacción entre cuádrupletos.
- $S_{in,1}$: Término del mecanismo lineal de la generación de oleaje por viento.
- $S_{in,2}$: Términos del mecanismo exponencial de la generación de oleaje por viento.
- S_{wc} : Término de whitecapping.
- S_{XY} : Covarianza entre los valores observados y los valores modelados.
- S_X : Varianza de los valores observados.
- S_Y : Varianza de los valores modelados.
- T_p : Periodo peak del oleaje.
- U_{10} : Velocidad del viento a 10 [m] de altura.
- U_z : Velocidad del viento a z [m] de altura.
- U_* : Velocidad de fricción.
- x : Estadígrafo.
- \hat{x} : Estadígrafo normalizado.
- \bar{X} : Promedio de los valores observados.

- X_i : Valores observados.
- \hat{Y}_i : Corrección lineal de los valores modelados.
- \bar{Y} : Promedio de los valores modelados.
- Y_i : Valores modelados.
- z : Altura del viento.
- z_e : Rugosidad efectiva de la superficie.

LETRAS GRIEGAS

- β : Constante de Miles.
- Γ : Coeficiente dependiente del peralte de la ola.
- δ : Coeficiente ajustable de la formulación de Hasselmann (1974).
- θ : Dirección de la ola.
- θ_{viento} : Dirección del viento superficial.
- κ : Constante de Von Karman.
- λ : Altura crítica no dimensional.
- ρ_{agua} : Densidad del agua.
- ρ_{aire} : Densidad del aire.
- σ_{SD} : Desviación estándar.
- σ : Frecuencia relativa en radianes, en un sistema en movimiento con la corriente.
- σ_{PM}^* : Frecuencia peak del espectro de Pierson Moskowitz.
- $\bar{\sigma}$: Frecuencia promedio del oleaje.
- ω : Factor de peso relativo para la evaluación de desempeño.

RESUMEN

El Seno de Reloncaví corresponde a un sistema semicerrado, delimitado por una línea de costa casi circular, por lo que el mar de viento es preponderante en el sector. Debido a esta configuración son importantes las condiciones locales a la hora de tomar decisiones ante situaciones de mal clima, donde las Capitanías de Puerto están facultadas para declarar el cese de operaciones si las condiciones climáticas son peligrosas. Por este motivo, el objetivo de este proyecto consiste en la elaboración preliminar de un modelo operacional para generar pronósticos de oleaje que contribuyan a la toma de decisiones en el Seno de Reloncaví, mediante la utilización del modelo SWAN.

El oleaje se genera debido a la acción del viento gracias a dos mecanismos; un mecanismo lineal de acuerdo con la teoría Phillips (1957) y un mecanismo exponencial según la teoría de Miles (1957). El mecanismo lineal fue formulado por Cavaleri & Malanotte-Rizzoli (1981), y el exponencial posee una formulación hecha por Komen et al. (1984) y otra por Janssen (1989, 1991). En SWAN, cada una de estas formulaciones posee de forma predefinida parametrizaciones para la disipación por whitecapping.

Para la implementación del modelo se utilizaron datos de viento del modelo GFS perteneciente a NOMADS, se elaboró un modelo digital de elevación a partir de cartas náuticas del SHOA, y se estudiaron las parametrizaciones del modelo SWAN. Con esta información, se realizó la calibración del modelo y el estudio de las formulaciones que utiliza.

A partir de la calibración se concluyó que el warming up del modelo oscila entre uno y dos días de simulación, junto con que la resolución temporal debe ser menor o igual a 10 minutos al ejecutar SWAN en modo no estacionario. El modelo no presentó buen ajuste con las mediciones, por lo que se recomienda evaluar otra base de datos de viento, utilizar registros de oleaje en zonas abiertas del Seno de Reloncaví, utilizar información batimétrica de mayor calidad y utilizar un mejor hardware. Por otra parte, al analizar las formulaciones de los mecanismos de generación por viento y las parametrizaciones para el whitecapping, se determinó que la formulación de Janssen es más disipativa que Komen para modelar mar de viento. Finalmente, se elaboró una lista de pasos para continuar el desarrollo del modelo.